

Тенденции межгодовой изменчивости поля солёности верхнего 1000-метрового слоя северо-восточной части Тихого океана в условиях современного глобального потепления

И. Д. Ростов , Е. В. Дмитриева

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия

 rostov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 21.08.2023; одобрена после рецензирования 06.03.2024;
принята к публикации 15.03.2024.

Аннотация

Цель. Определить тенденции и региональные особенности межгодовых изменений солёности и солесодержания в верхнем 1000-метровом слое внетропической зоны северо-восточной части Тихого океана и дать анализ их возможных причинно-следственных связей с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере за два последних десятилетия современного периода глобального потепления.

Методы и результаты. Использовались данные климатических массивов NOAA, включающие систему усвоения океанографических наблюдений GODAS в узлах регулярной сетки, данные по количеству атмосферных осадков и ряды климатических индексов. Были взяты среднемесячные данные реанализа ERA5 по осадкам и испарению с подстилающей поверхности. Применялись методы кластерного, корреляционного, регрессионного анализа и аппарата эмпирических ортогональных функций. В результате исследований определены региональные пространственно-временные особенности изменений солёности и солесодержания в толще вод верхних 1000 м исследуемого региона в условиях современной фазы потепления, сопровождающегося интенсификацией глобального гидрологического цикла. Дана оценка количественных характеристик отмеченных тенденций и их статистической значимости.

Выводы. Пространственное распределение трендов значений разности испарение-осадки ($E-P$) демонстрирует преобладающий характер испарения на большей части акватории, что отличается от глобальных тенденций гидрологического цикла в средних и высоких широтах Северного полушария, особенно за предшествующий период. В целом по региону наблюдался статистически значимый положительный тренд солесодержания в верхней 1000-метровой толще вод северного района, а в других районах и в среднем по акватории в этом слое наблюдались небольшие статистически не значимые отрицательные тренды. Корреляционные связи изменений среднегодовых значений солёности и солесодержания с различными крупномасштабными, региональными процессами и климатическими переменными наиболее выражены через следующие параметры: климатические индексы $NPQO$, IPO , PDO , AD , первую моду ЭОФ колебаний значений $PC1$ разности испарение-осадки ($E-P$) и вторую моду ЭОФ аномалии геопотенциала изобарической поверхности AT_{500} .

Ключевые слова: северо-восточная часть Тихого океана, внетропическая зона, климатические изменения, гидрологический цикл, солёность, солесодержание, тренды, региональные особенности, климатические индексы, корреляционные связи

Благодарности: работа выполнена по теме государственного задания ТОИ ДВО РАН № 121021700346-7 «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов». Авторы благодарят разработчиков за возможность использовать климатические данные, размещенные на сайтах NOAA.

Для цитирования: Ростов И. Д., Дмитриева Е. В. Тенденции межгодовой изменчивости поля солености верхнего 1000-метрового слоя северо-восточной части Тихого океана в условиях современного глобального потепления // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 3. С. 386–401. EDN PAVWNH.

Original article

Trends in the Interannual Variability of Salinity Field in the Upper 1000-Meter Layer of the Northeastern Pacific Ocean under Conditions of Modern Global Warming

I. D. Rostov ✉, E. V. Dmitrieva

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
✉ rostov@poi.dvo.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at determining the trends and the regional features of interannual changes in salinity and salt content in the upper 1000-m layer of the extratropical zone in the northeastern Pacific Ocean, and at analyzing their possible cause-and-effect relations with the large-scale and regional processes in the ocean and atmosphere over the last two decades of the current period of global warming.

Methods and Results. The NOAA climate data sets including the GODAS oceanographic data assimilation system in the nodes of a regular grid, as well as the data on the amount of atmospheric precipitation and the series of climate indices were used in the study. The monthly average ERA5 reanalysis data on precipitation and evaporation from the underlying surface were also applied. The methods of cluster, correlation and regression analysis, as well as the apparatus of empirical orthogonal functions were involved. The conducted research resulted in identifying the regional spatial and temporal features of the changes in salinity and salt content in the upper 1000-m water column of the study area under conditions of the current warming phase accompanied by the intensification of global and local hydrological cycles. The quantitative characteristics of the noted trends and their statistical significance were assessed.

Conclusions. The spatial distribution of evaporation-precipitation ($E-P$) difference trends demonstrates a predominant evaporation pattern over most of the water area that differs from the global trends in a hydrological cycle in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere, especially over the previous period. In general, a statistically significant positive trend in salt content was observed in the upper 1000 m of water column in the northern area, whereas in the other regions and on the average over the whole water area, small statistically insignificant negative trends were noted in the above mentioned layer. The correlation relations between the changes in average annual salinity and salt content values, on the one hand, and different large-scale regional processes and climate variables, on the other hand, are most manifested through the following parameters: climate indices $NPGO$, IPO , PDO and AD , the first mode of EOF of fluctuations in the $PC1$ values of evaporation-precipitation ($E-P$) difference, and the second mode of EOF of anomaly of the isobaric surface AT_{500} geopotential.

Keywords: northeastern part of the Pacific Ocean, extratropical zone, climate changes, hydrological cycle, salinity, salt content, trends, regional features, climate indices, correlations

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the theme of state assignment of POI FEB of RAS No. 121021700346-7 “Study of the main processes which determine state and variability of oceanological characteristics of the marginal seas of Asia and the adjacent regions of the Pacific and Indian oceans”. The authors are grateful to the developers for the opportunity to use the climatic data posted on the *NOAA* websites.

For citation: Rostov, I.D. and Dmitrieva, E.V., 2024. Trends in the Interannual Variability of Salinity Field in the Upper 1000-Meter Layer of the Northeastern Pacific Ocean under Conditions of Modern Global Warming. *Physical Oceanography*, 31(3), pp. 350-363.

Введение

Современные климатические изменения, происходящие в различных гео-сферах, сопровождаются интенсификацией глобального круговорота воды (гидрологический цикл) и значительными изменениями солености поверхности океана (СПО) и солесодержания толщи его вод в масштабах от регионального до глобального [1–5]. Поле солености (S) отражает крупномасштабный долговременный баланс между различными компонентами поверхностного потока пресной воды, процессами горизонтальной адвекции и перемешивания в океане [5–7]. Над открытым океаном вдали от прибрежных районов и высоких широт, где воздействие речного стока и таяния льда ограничено, испарение за вычетом осадков является основным фактором, воздействующим на поток пресной воды, который вместе с динамическими процессами в океане приводит к изменчивости его солености [8]. Соответствующий отклик на изменения гидрологического цикла отличается значительной пространственно-временной неоднородностью и прослеживается в виде областей аномалий и трендов солености и солесодержания различных значений и знака как на поверхности, так и в толще вод океанов и морей [9, 10]. Причем вследствие своего небольшого объема по отношению к площади поверхности акватории окраинных морей реагируют на изменяющиеся характеристики пресного баланса сильнее, чем в открытом океане [7, 11]. В отличие от термических характеристик формирование особенностей поля солености в различных регионах Мирового океана имеет более сложный, комплексный и неоднозначный характер [7, 9, 11–15].

В ходе исследований современных изменений термических условий северной части Тихого океана, вызванных сдвигом климатического режима и глобальным потеплением, выявлены крупномасштабные пространственно-временные неоднородности межгодовой изменчивости термических характеристик воды и воздуха и даны оценки их количественных значений и статистической значимости на рубеже XX–XXI вв. [16]. Примерно с 2013 г., после завершения периода «паузы в ходе глобального потепления» [17], распространенным явлением в северо-восточной части Тихого океана стали морские волны тепла – локальные области с экстремально высокими температурами на поверхности океана (ТПО), связанные с атмосферными воздействиями в результате нарушения энергетического баланса Земли [17, 18]. В 2014–2016 и 2019–2020 гг. эти области с аномалиями ТПО до 2,5–3°C распространились

вдоль западного побережья Северной Америки и на большую часть северо-востока Тихого океана, формируя трехмерные термические структуры, охватывающие верхний слой океана толщиной несколько сотен метров и сохраняющиеся длительное время [19]. В целом в истекший 20-летний период начала XXI в. регион северо-восточной части внутритропической зоны Тихого океана отличался более высокими темпами потепления (ТПО) по сравнению с аналогичным предшествующим периодом, в то время как в сопредельном регионе северо-западной части этой области наблюдалась противоположная тенденция [16]. Недавно проведенные исследования [20] позволили выявить и охарактеризовать региональные пространственно-временные особенности ускоренных изменений солёности и солесодержания в толще вод верхних 1000 м северо-западной части Тихого океана в первые десятилетия XXI в., сопровождающихся интенсификацией глобального и местных гидрологических циклов. Было показано, что по всему указанному региону наблюдались статистически значимые отрицательные тренды разности значений испарение-осадки, соответствующие усилению тенденций режима увлажнения на поверхности океана. Также в этот период отмечались значительные изменения различных показателей циркуляции атмосферы и океана, которые сопровождались усилением водообмена внутритропической зоны океана с сопредельными регионами, что привело к формированию обширных объемов толщ вод, подверженных как опреснению, так и осолонению и последующей трансформации. В целом по акватории внутритропической зоны северо-западной части Тихого океана прослеживалась тенденция постепенного уменьшения средних значений солёности у поверхности и опреснения вод верхнего 1000-метрового слоя [5, 10].

Представляет интерес рассмотреть региональные особенности межгодовой изменчивости пространственной структуры поля солёности и солесодержания толщ вод верхнего 1000-метрового слоя северо-восточной части Тихого океана, сопоставить полученные результаты с соответствующими характеристиками для сопредельных регионов, что позволит уточнить более общие аналогичные оценки, ранее выполненные по Мировому океану в целом [5, 9, 10].

Цель настоящей работы – определение пространственно-временных особенностей межгодовых изменений солёности верхнего 1000-метрового слоя внутритропической зоны северо-восточной части Тихого океана и анализ их возможных причинно-следственных связей с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере в начале XXI столетия.

Данные и методы

Как и в предыдущей работе авторов [20], использовались данные по солёности и скорости течений системы усвоения океанографических наблюдений *GODAS* в узлах сетки $0,3^\circ \times 1^\circ$ сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.godas.html> за период 2000–2022 гг. Также были использованы среднемесячные данные по количеству осадков (*P*) реанализа *ERA5* на сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ с сайта http://apdrc.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/hawaii_soest_d124_2bb9_c935.html и испарению (*E*) с подстилающей поверхности *WHOI OAFflux version3* на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ с сайта http://apdrc.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/hawaii_soest_6b5a_df06_3eeb.html?page=1. По этим данным рассчитывалась разность *E-P* в узлах одноградусной сетки.

Также были взяты данные реанализа полей давления и ряды климатических (циркуляционных) индексов (КИ) [16]: *NP*, *NPGO*, *PDO*, *SOI*, *PTW*, *IPO*, *WP*, *NINO.WEST* и *WPWP* за те же годы. Перечисленные данные были получены с сайтов NOAA <https://psl.noaa.gov/data/gridded/index.html> и <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>. Дополнительно по приземному атмосферному давлению рассчитывался индекс азиатской депрессии (*AD*).

Проводились расчет статистик и разложение полей аномалий различных характеристик на главные компоненты (*PC*) ЭОФ по единой методике [16, 20]. Также по данным *GODAS* по солёности на 31 горизонте (верхний горизонт 5 м) были рассчитаны значения солесодержания (Q_s) и их аномалий (ΔQ_s) в различных слоях от поверхности до глубины 1000 м согласно уравнению, приведенному в работе [21, с. 3520].

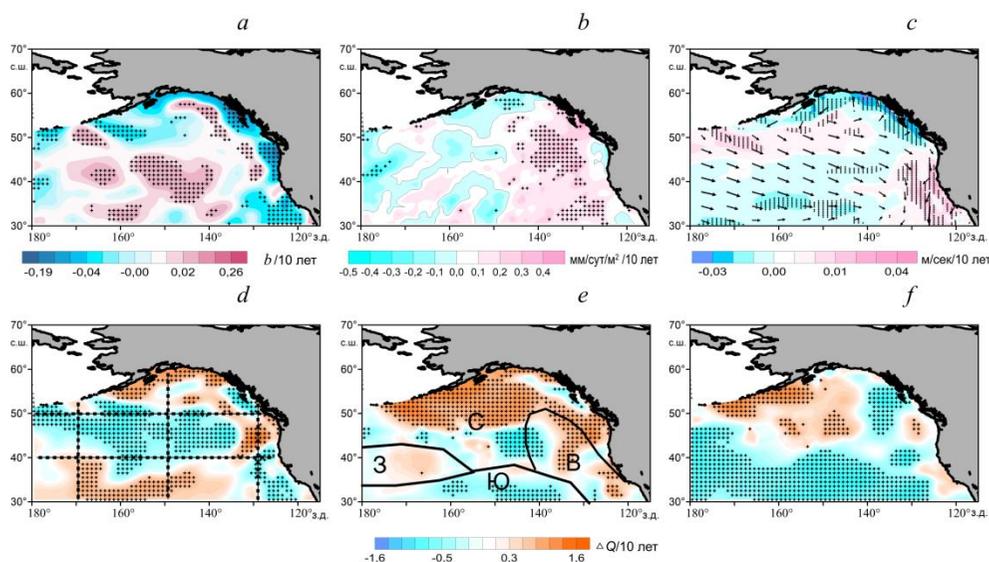


Рис. 1. Тренды среднегодовой солёности на горизонте 5 м (*a*), тренды среднегодовых значений разности испарение-осадки (*b*), течения (стрелки) и тренды скорости течений (выделены цветом) на горизонте 5 м по данным *GODAS* (*c*), тренды нормализованных значений солесодержания в слоях 5–200 м (*d*), 200–460 м (*e*) и 460–950 м (*f*) в 2000–2022 гг. На фрагменте *d* показано расположение разрезов, на фрагменте *e* – выделенных районов (З, С, В, Ю). Здесь и на других рисунках крестиками обозначены области, в которых оценки статистически значимы на уровне 95%

Fig. 1. Trends in average annual salinity at the 5 m level (*a*), trends in annual average values of evaporation-precipitation differences (*b*), currents (arrows) and current velocity trends (highlighted in color) at the 5 m level based on the *GODAS* data (*c*), trends in the normalized salt content values in the 5–200 m (*d*), 200–460 m (*e*) and 460–950 m (*f*) layers in 2000–2022. Fig. 1, *d* shows the location of sections, and Fig. 1, *e* – the location of selected regions (W, N, E and S). Here and in other figures, crosses indicate the areas where the estimates are statistically significant (95%)

По осредненным за весь период данным межгодовых изменений солёности на различных горизонтах верхнего 500-метрового слоя в каждом узле сетки методом кластерного анализа по трем главным компонентам ЭОФ $S(z)$ выде-

лены четыре обособленных района, расположенных в различных частях акватории моря: северный (С), западный (З), восточный (В) и южный (Ю) (рис. 1, *e*). При использовании этого метода кластерного анализа для районирования исследуемой акватории по межгодовым колебаниям солесодержания ΔQ_s в слое 5–200 м (как это было сделано ранее для сопредельного региона [20]) результаты оказались малоинформативными вследствие чрезмерной фрагментации области исследований.

В дальнейшем путем простого осреднения сеточных данных в пределах акваторий этих районов рассчитывался многолетний ход солености на каждом из 31 горизонта и солесодержания в отдельных слоях: верхнем (5–200 м), промежуточном (200–460 м) и глубинном (460–950 м).

Особенности межгодовой пространственно-временной изменчивости характеристик поля солености

В исследуемой акватории выделяются северный (С) и восточный (В) районы с характерными чертами, присущими субарктической структуре вод, а также западный (З) и южный (Ю) районы с чертами, характерными для области смешения вод субарктической и субтропической структур (рис. 1, *e*)¹ [22]. В пределах всей акватории прослеживаются составляющие потоков Субарктического и Северо-Тихоокеанского течений, Калифорнийской и Аляскинской систем течений [22, 23], в межгодовых изменениях которых присутствуют статистически значимые тренды модуля скорости течений различного знака (рис. 1, *c*).

В исследуемый период в межгодовом ходе среднегодовой солености на приповерхностном горизонте 5 м выражены статистически значимые тренды обоих знаков с максимальными значениями $-0,19 \dots 0,06/10$ лет. Области с максимальными отрицательными трендами солености располагаются на периферии исследуемого региона – на участках акваторий океана, прилегающих к североамериканскому материку и Алеутским островам. Эти участки прибрежных акваторий подвержены влиянию изменений материкового стока и водообмена с Беринговым морем. В среднем по исследуемому региону наблюдалась тенденция незначительного увеличения солености на этом горизонте в отличие от региона северо-западной части Тихого океана, на акватории которого отмечались значимые отрицательные тренды солености [20]. Все области с положительными и отрицательными трендами солености (рис. 1, *a*) выражены на акватории как в теплый, так и в холодный период года.

На горизонте 200 м нижней границы верхнего слоя были выражены статистически значимые тренды среднегодовой солености обоих знаков с максимальными значениями $-0,03 \dots 0,14/10$ лет, на глубине 500 м – до $-0,03 \dots 0,05/10$ лет. При этом в нижней части глубинного слоя на горизонтах, расположенных глубже 900 м, в пределах всей акватории северо-восточной части Тихого океана наблюдались только небольшие статистически значимые отрицательные градиенты солености, до $-0,02/10$ лет.

¹ Тихий океан. Гидрология Тихого океана / Отв. ред. А. Д. Добровольский. М. : Наука, 1968. 524 с.

В целом по исследуемому региону статистически значимые тренды межгодовых колебаний среднегодового количества осадков и испарения – показателей режима увлажнения подстилающей поверхности – не выражены. Осредненный по всей акватории максимальный положительный тренд как количества осадков, так и испарения ($\sim 0,04$ мм/сут/ m^2 за 10 лет) был выражен в теплый период года. Эти результаты согласуются с аналогичными оценками количества осадков, полученными по данным сайта <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cmap.html> на сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Пространственное распределение трендов разности испарение-осадки ($E-P$) демонстрирует преобладающее влияние испарения на большей части акватории, статистически значимое в ее восточной части (рис. 1, *b*), что явно не согласуется с распределением трендов солености у поверхности океана и солесодержания в различных слоях (рис. 1, *a, d-f*) и не соответствует общим глобальным тенденциям гидрологического цикла в средних и высоких широтах Северного полушария [5, 7, 9], особенно за предшествующий период 1950–2000 гг.² Как отмечалось ранее [5, 20], в отличие от многолетних изменений характеристик солености и увлажнения поверхности океана в глобальном масштабе [10] в средних и высоких широтах тенденции пространственных изменений разности $E-P$ могут не согласовываться с соответствующими региональными тенденциями изменений солености, поскольку динамика океана и местные факторы также могут играть контролирующую роль в изменениях солености на поверхности и в толще вод океана, обеспечивая региональный баланс поля солености [9].

Схемы пространственных особенностей межгодовых изменений трендов солесодержания (Q_s) верхнего, промежуточного и глубинного слоев значительно различаются (рис. 1, *d-f*), как это отмечалось и для сопредельного региона северо-западной части внетропической зоны [20]. При этом схемы пространственного распределения трендов солесодержания верхнего и промежуточного слоев в теплый и холодный периоды года не показывают заметных различий.

Отметим, что структуры схем пространственного распределения солесодержания в глубинном слое как северо-восточного, так и северо-западного регионов [20], в которых наблюдается четкая зональная ориентация границы ($\sim 40-45^\circ$ с. ш.) крупномасштабных областей с противоположным знаком трендов солесодержания, хорошо согласуются между собой. Отмеченные тенденции уменьшения солености и солесодержания глубинного слоя в условиях интенсификации глобального гидрологического цикла согласуются и с результатами других исследователей [7, 9, 10]. Вместе с тем в пределах каждого из слоев прослеживаются обширные области, в которых в течение последних двух десятилетий происходит либо опреснение, либо осолонение толщи вод с различной скоростью – в среднем по акватории со скоростью $-1,4 \dots 0,8$ кг/ m^2 /10 лет (рис. 1, *d-f*, табл. 1).

² Climate change 2013 – The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change / Eds. T. F. Stocker [et al.]. Cambridge, United Kingdom : Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Оценки линейного тренда соленосодержания (Q_s , кг/м²/10 лет) в различных слоях толщи вод выделенных районов и всей акватории в период 2000–2022 гг.
Estimates of the linear trend of salt content (Q_s , kg/m²/10 years) of various layers of the water column in the identified areas and the entire water area in 2000–2022

Районы / Regions	Границы слоя, м / Layer boundaries, m			
	5-200	200-460	460-950	5-950
С / N	-0,33	1,85	0,28	0,60
З / W	0,74	0,66	-2,40	-0,33
В / E	-0,38	0,55	-0,80	-0,21
Ю / S	3,12	-1,04	-2,83	-0,25
Среднее по акватории / Average over the whole water area	0,79	0,51	-1,44	-0,05

Пр и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 2 полужирным шрифтом выделены статистически значимые (95%) оценки.

N o t e. Here and in table 2, statistically significant (95%) estimates are highlighted in bold.

Обобщенно по акваториям отдельных районов: наибольшие значимые положительные тренды соленосодержания наблюдаются в верхнем слое южного района (3,12 кг/м²/10 лет) и в промежуточном слое северного (1,85 кг/м²/10 лет); наибольшие значимые отрицательные тренды (–2,83 кг/м²/10 лет) – в глубинном слое южного района. В целом по региону наблюдался статистически значимый положительный тренд соленосодержания в верхней 1000-метровой толще вод северного района, а в других районах и в среднем по акватории в этом слое наблюдались небольшие статистически не значимые отрицательные тренды (табл. 1). Указанные оценки тенденций, трендов и региональных особенностей межгодовых изменений структуры поля солености позволяют детализировать полученные ранее оценки изменений, происходящих в глобальном масштабе в условиях интенсификации гидрологического цикла [1, 7, 9, 10].

Как и в сопредельном регионе северо-западной части Тихого океана [20], главные особенности пространственной структуры трендов соленосодержания верхнего слоя (рис. 1, *d*) хорошо согласуются со схемой распределения коэффициентов первой моды ЭОФ1 разложения аномалий Q_s этого слоя, что дает возможность использования главного компонента ($PC1$) этого способа параметризации колебаний Q_s для установления корреляционных связей с различными климатическими параметрами.

Межгодовая изменчивость вертикальной структуры солености верхнего 1000-метрового слоя

Формирование и изменчивость вертикальной структуры поля солености происходят в результате непрерывного взаимодействия разнообразных процессов на поверхности, вертикального перемешивания и внутриводного обмена. На рис. 2 представлены средние профили вертикального распределения солености $S(z)$, амплитудной структуры флуктуаций аномалий $S(z)$ – главного

компонента $PC1$ ЭОФ и трендов $b(z)$ солёности на различных горизонтах в пределах выделенных районов по данным межгодовой изменчивости $S(z)$ для периода 2000–2022 гг.

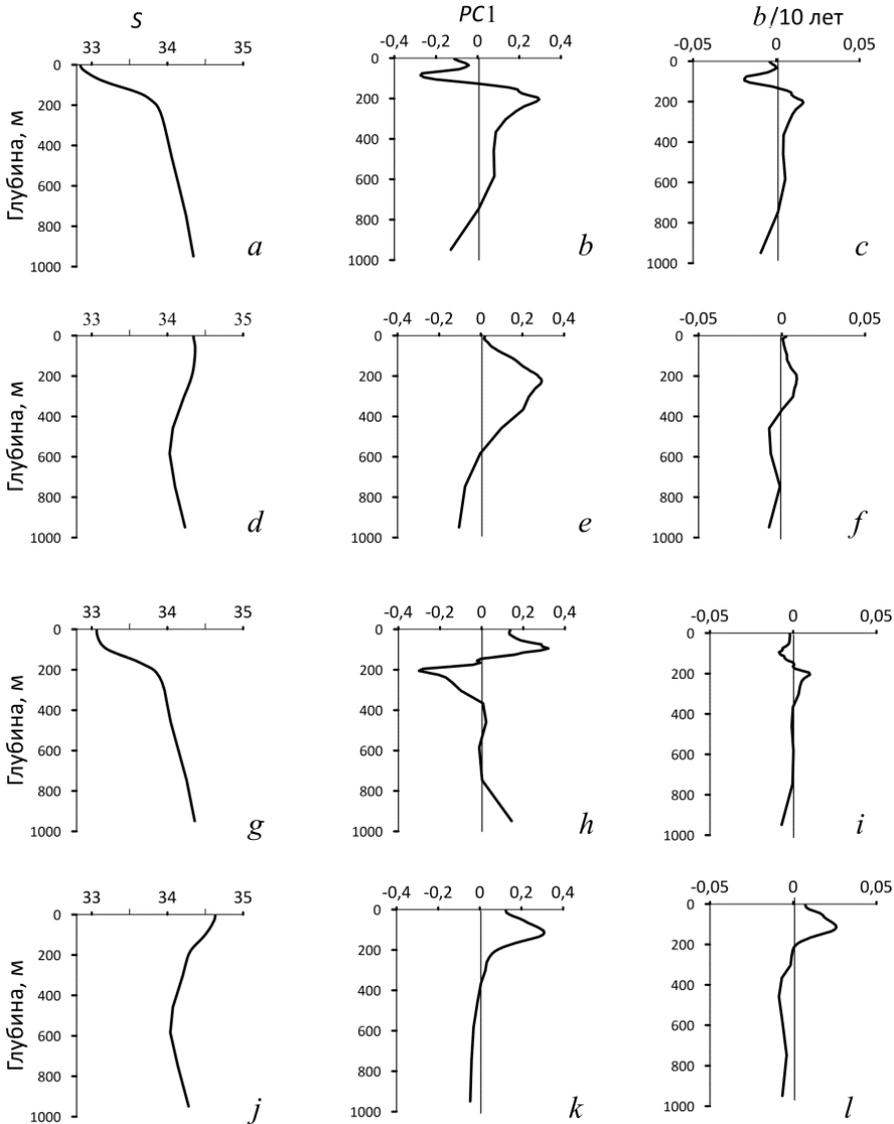


Рис. 2. Обобщенные кривые вертикального распределения солёности (a, d, g, j), главного компонента $PC1$ ЭОФ аномалий солёности (b, e, h, k) и тренда b солёности на различных горизонтах (c, f, i, l) за 2000–2022 гг. Сверху вниз: районы С, З, В, Ю согласно рис. 1, e

Fig. 2. Generalized curves of vertical distribution of salinity (a, d, g, j), main component $PC1$ of EOF of salinity anomalies (b, e, h, k) and salinity trend (b) at different levels (c, f, i, l) for 2000–2022. From top to bottom: the N, W, E and S areas according to Fig. 1, e

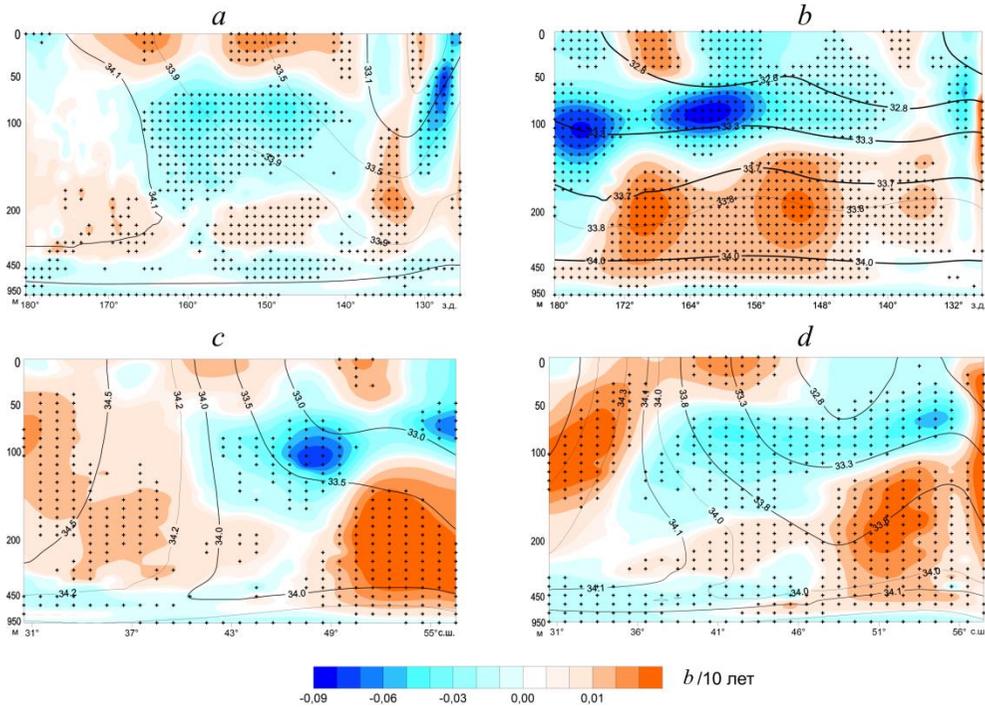
Как отмечалось выше, особенности вертикальной структуры солености районов С и В характерны для субарктической структуры вод с монотонным увеличением S с глубиной (рис. 2, *a, g*), а районов З и Ю – для области смешения вод субарктической и субтропической структур с немонотонным изменением солености (рис. 2, *d, j*) [22]. Кривые $PC1(z)$ (рис. 2, *b, e, h, k*) примерно соответствуют вертикальному распределению значений диапазона ее изменений в межгодовом ходе (до 0,07–0,09 в верхнем 200-метровом слое западного и южного районов) и вертикальному распределению трендов солености $b(z)$ во всех районах (рис. 2, *c, f, i, l*). Коэффициент корреляции (R) колебаний $PC1(z)$ и $b(z)$ статистически значим и составляет $\pm 0,84$ – $0,98$. В целом на главный компонент $PC1$ межгодовой изменчивости профилей солености в исследуемых районах приходится от 43% (район В) до 63–83% (для других районов) общей дисперсии солености на различных горизонтах.

Анализ межгодовых трендов статистически значимых изменений вертикальной структуры солености в среднем по отдельным районам показал, что максимальные отрицательные тренды ($-0,02/10$ лет) наблюдались в северном районе (рис. 2, *c*), а максимальные положительные ($0,03/10$ лет) – в южном районе (рис. 2, *l*), в слое верхнего халоклина. Показателями общих тенденций крупномасштабных межгодовых изменений поля солености исследуемого региона являются характеристики солесодержания толщи вод. Согласно данным табл. 1 и рис. 1, *d–f*, в пределах внетропической зоны северо-восточной части Тихого океана в последние десятилетия преобладали тенденции как осолонения, так и опреснения вод верхнего, промежуточного и глубинного слоев отдельных районов. Однако, в отличие от северо-западного сектора этой зоны [20], статистически значимых трендов солесодержания, свидетельствующих о тенденциях осолонения или опреснения толщи вод верхнего 1000-метрового слоя всего северо-восточного сектора, не выявлено. Увеличение трендов теплосодержания этого слоя региона внетропической зоны северо-восточной части Тихого океана ($\sim 2\%$) [24] также было статистически не значимым.

Пространственные особенности вертикальной структуры толщи вод с различными значениями трендов распреснения и осолонения отображены на зональных и меридиональных разрезах, пересекающих акваторию региона (рис. 3). На большей части площади в плоскости всех разрезов выражены статистически значимые тренды солености различных значений и знака, формирующие структуры крупномасштабных аномалий солесодержания в различных слоях толщи вод (рис. 1, *d–f*).

Южный зональный разрез вдоль 40° с. ш. пересекает западный, восточный районы и южную часть северного (рис. 3, *a*; 1, *d*). Наибольшие положительные тренды солености, до $0,02$ – $0,03/10$ лет, прослеживаются в верхнем 30-метровом слое в центральной части этого разреза и в слое 120–220 м в его восточной части; наибольшие отрицательные тренды, до $-0,07/10$ лет, – в верхнем 100-метровом слое у североамериканского побережья, подверженного влиянию материкового стока и апвеллинга [22].

Формирование трендов межгодовых изменений солёности на северном зональном разрезе (рис. 3, *b*; 1, *d*), в отличие от южного, происходит в условиях отсутствия заметных горизонтальных широтных градиентов пространственного распределения солёности в пределах всего 1000-метрового слоя. В нижней части верхнего 150-метрового слоя западной части разреза преобладают отрицательные тренды солёности с максимальными значениями до $-0,08/10$ лет в этом слое. В верхней части 150-метрового слоя, в западной и восточной частях разреза по 50° с. ш., прослеживаются локальные области с положительными трендами S . Положение этих областей согласуется со схемой горизонтального распределения значений разности $E-P$ (рис. 1, *b*). В слое 150–600 м на большей части разреза выражены положительные тренды солёности с максимальным значением на горизонте 200 м до $0,02-0,04/10$ лет, а ниже него знак тренда вновь меняется на противоположный. Полученные результаты позволяют детализировать общие региональные особенности межгодовой изменчивости вертикальной структуры поля солёности в северном (рис. 2, *c*) и других районах.



Р и с. 3. Совмещенное вертикальное распределение солёности (сплошные линии) и трендов солёности (выделены цветом) на зональных разрезах по 40° с. ш. (*a*), по 50° с. ш. (*b*) и на меридиональных разрезах по 170° з. д. (*c*) и по 150° з. д. (*d*) в период 2000–2022 гг. Расположение разрезов показано на рис. 1, *d*

Fig. 3. Combined vertical distribution of salinity (solid lines) and salinity trends (highlighted in color) on the zonal sections along 40° N (*a*) and 50° N (*b*), and on the meridional sections along 170° W (*c*) and 150° W (*d*) in 2000–2022. Section locations are shown in Fig. 1, *d*

Формирование трендов межгодовых изменений солёности на меридиональных разрезах по 170° , 150° и 130° з. д. (рисунок не приводится) происходит в условиях значительных пространственных градиентов поля солёности (рис. 3, *c*, *d*; 1, *d*). Отметим, что максимальные отрицательные тренды солёности со значением до $-0,07/10$ лет были локализованы на горизонтах 70 и 120 м в северной части западного разреза (170° з. д.) вблизи Алеутской островной гряды. Области с максимальными значениями положительных трендов S ($0,06/10$ лет) прослеживаются в различных участках верхнего и промежуточного слоев на всех рассматриваемых разрезах, где они вытянуты в широтном направлении.

Анализ карт межгодовой изменчивости течений на горизонтах 105 и 205 м, построенных по данным *GODAS*, показал, что аномальные экстремумы положительных и отрицательных трендов солёности, расположенные вблизи этих горизонтов, соответствуют областям локализации статистически значимых трендов модуля скорости течений со значением до $\pm 0,03$ м/с/10 лет.

Тенденции изменчивости вертикальной и горизонтальной структуры поля солёности отражаются в соответствующих изменениях характеристик солесодержания различных слоев толщи вод (рис. 1, *d* – *f*). Отметим, что значения трендов солёности в толще вод исследуемого региона примерно в 2–10 раз (в зависимости от знака) меньше, чем в северо-западной части внетропической зоны Тихого океана [20], лежащей в той же климатической зоне.

Корреляционные связи межгодовых изменений характеристик поля солёности с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере

Был проведен взаимный корреляционный и регрессионный анализ межгодовых вариаций временных рядов солесодержания и временных коэффициентов первой (*PC1*) и второй (*PC2*) мод ЭОФ разложения аномалий Q_s в верхнем и промежуточном слоях толщи вод – с изменениями климатических индексов и других показателей, характеризующих как динамику климатической системы атмосферы и океана, так и режим увлажнения в исследуемом регионе. Основные характеристики этих климатических переменных и их временной изменчивости уже рассматривались авторами ранее [20, 24].

В целом по региону корреляционные связи изменений среднегодовых значений солесодержания Q_s и его главных компонентов *PC1* и *PC2* с различными климатическими переменными наиболее выражены со следующими параметрами: индексами *NPGO* (с временным лагом 1 год), *IPO*, *PDO*, *AD*, первой модой ЭОФ колебаний значений разности испарение-осадки (*E-P*) и второй модой ЭОФ аномалии геопотенциала изобарической поверхности AT_{500} (табл. 2).

Межгодовые изменения некоторых из этих переменных взаимосвязаны, что приводит к идентичности соответствующих оценок коэффициентов корреляции, приведенных в табл. 2 (слой 5–200 м) для пар переменных *PC1(E-P)* –

$PC2(\Delta AT_{500})$, $PDO - AD$. Как и в других районах [20], с глубиной теснота корреляционных связей изменчивости климатических параметров, солености и солесодержания затухает.

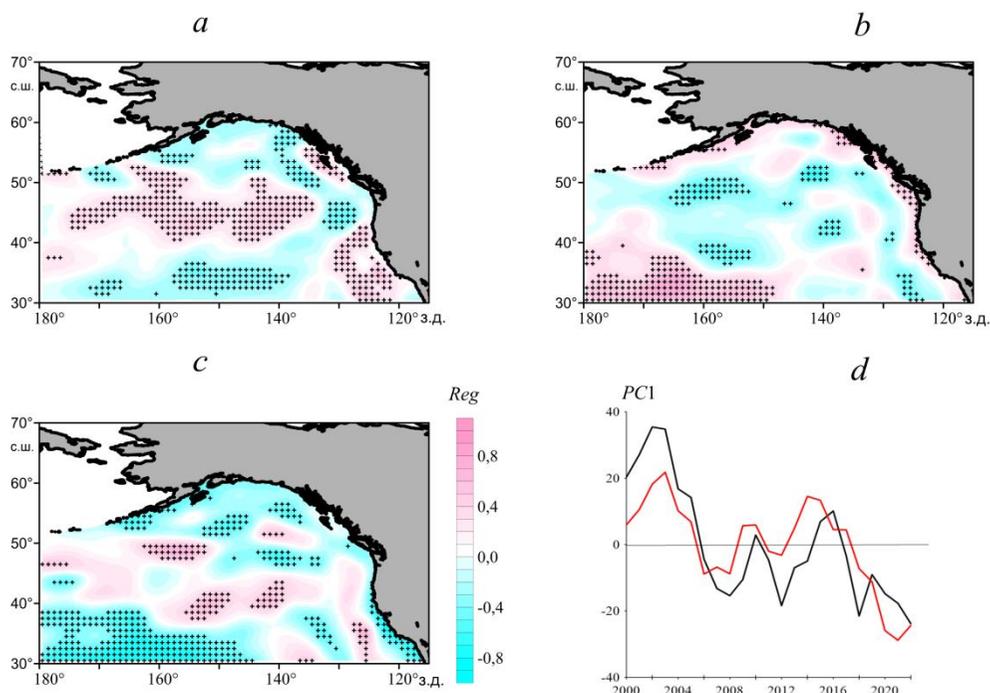
Карты пространственного распределения коэффициентов парной регрессии (рис. 4) дают наглядное представление о характере пространственных особенностей и тесноте корреляционных связей между изменениями солесодержания и важнейшими из климатических параметров в различных районах. Причем соответствующие схемы для каждой из пар переменных, рассмотренных выше, подобны. С учетом различного знака коэффициентов корреляции (табл. 2) эти особенности (рис. 4, *a - c*) хорошо согласуются со схемами распределения трендов солесодержания в верхнем слое (рис. 1, *d*).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Коэффициенты корреляции главных компонентов и среднегодовых значений солесодержания (Q_s) в слоях 5–200 и 200–460 м с климатическими индексами для различных районов за 2000–2022 годы
Correlation coefficients of principal components and annual average salt content values (Q_s) in the 5–200 m and 200–460 m layers with climatic indices for different regions for 2000–2022

Компоненты и районы / Components and regions	Параметры / Parameters					
	<i>NPGO</i>	<i>IPO</i>	<i>PC1(E-P)</i>	<i>PC2(ΔAT₅₀₀)</i>	<i>PDO</i>	<i>AD</i>
Слой 5–200 м / 5–200 m layer						
<i>PC1</i>	0,7	0,2	-0,4	-0,6	0,5	0,5
<i>PC2</i>	0,8	-0,5	0,4	0,3	-0,6	-0,6
<i>C / N</i>	0,2	-0,2	0,3	0,0	-0,3	-0,4
<i>З / W</i>	0,1	-0,4	0,5	0,5	-0,5	-0,5
<i>В / E</i>	0,5	-0,2	0,0	-0,2	-0,3	-0,3
<i>Ю / S</i>	-0,5	-0,6	0,5	0,7	-0,6	-0,6
Вся акватория / Whole water area	-0,2	-0,6	0,6	0,6	-0,8	-0,8
Слой 200–460 м / 200–460 m layer						
<i>PC1</i>	-0,6	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1
<i>PC2</i>	-0,3	-0,4	0,5	0,5	-0,4	-0,5
<i>C / N</i>	-0,6	-0,1	0,2	0,2	-0,1	-0,2
<i>З / W</i>	0,2	-0,4	0,5	0,2	-0,5	-0,4
<i>В / E</i>	-0,6	0,0	0,4	0,3	-0,1	-0,2
<i>Ю / S</i>	0,3	-0,2	0,3	0,1	-0,3	-0,3
Вся акватория / Whole water area	0,0	0,4	0,6	0,3	-0,5	-0,6

Объясненная дисперсия (R^2) множественной регрессии изменчивости $PC1(Q_s)$ верхнего слоя 5–200 м и климатических переменных $NPGO$, $PC1(E-P)$, $PC2(\Delta H_{500})$ и PDO в период 2000–2022 гг. составила 60%, т. е. совокупность этих переменных удовлетворительно описывает наблюдаемые изменения главного компонента солесодержания (рис. 4, *d*).



Р и с. 4. Коэффициенты линейной регрессии (*Reg*) колебаний среднегодовых значений аномалий солесодержания верхнего слоя 5–200 м с *NPGO* (*a*), *PC1* разности испарение-осадки (*b*) и *PDO* (*c*) в 2000–2022 гг.; межгодовые изменения *PC1(Qs)* верхнего слоя (черная кривая) и аппроксимирующая кривая уравнения множественной регрессии (показана красным цветом) с различными климатическими индексами (*d*)

F i g. 4. Linear regression coefficients (*Reg*) of the fluctuations of average annual salinity anomaly values in the upper 5–200 m layer with *NPGO* (*a*), *PC1* of evaporation-precipitation difference (*b*) and *PDO* (*c*) in 2000–2022; interannual changes in *PC1(Qs)* of the upper layer (black curve), and fitting curve of the multiple regression equation (shown in red) with different climatic indices (*d*)

Заключение

В течение последних двух десятилетий в межгодовом ходе солёности на приповерхностном горизонте 5 м выражены статистически значимые тренды обоих знаков с максимальными значениями $-0,19 \dots 0,06/10$ лет. В среднем по исследуемому региону наблюдалась тенденция незначительного увеличения средней солёности на этом горизонте в отличие от региона северо-западной части Тихого океана, на акватории которого отмечались значимые отрицательные тренды солёности. С глубиной значения трендов уменьшаются. В целом эти значения в толще вод исследуемого региона примерно в 2–10 раз (в зависимости от знака) меньше, чем в северо-западной части внетропической зоны Тихого океана, лежащей в той же климатической зоне.

В пределах исследуемой акватории статистически значимые тренды межгодовых колебаний среднегодового количества осадков и испарения не выражены. В то же время пространственное распределение трендов значений разности испарение-осадки (*E-P*) демонстрирует преобладающий характер испа-

рения на большей части акватории, что отличается от общих глобальных тенденций гидрологического цикла в средних и высоких широтах Северного полушария, особенно за предшествующий период.

Схемы пространственных распределений межгодовой изменчивости трендов солесодержания верхнего, промежуточного и глубинного слоев значительно различаются между собой. Обобщенно: при сравнении акваторий отдельных районов исследуемой области установлено, что наибольшие значимые положительные тренды солесодержания наблюдаются в верхнем слое южного района ($3,12 \text{ кг/м}^2/10 \text{ лет}$) и в промежуточном слое северного ($1,85 \text{ кг/м}^2/10 \text{ лет}$), а наибольшие отрицательные тренды ($-2,83 \text{ кг/м}^2/10 \text{ лет}$) – в глубинном слое южного района. В целом по региону наблюдался статистически значимый положительный тренд солесодержания в верхней 1000-метровой толще вод северного района, а в других районах и в среднем по акватории в этом слое наблюдались небольшие статистически не значимые отрицательные тренды.

Корреляционные связи изменений среднегодовых значений солесодержания и главных компонент $PC1-2$ (Qs) с различными климатическими переменными наиболее выражены со следующими параметрами: климатическими индексами $NPGO$, IPO , PDO , AD , первой модой ЭОФ колебаний значений $PC1$ разности испарение-осадки ($E-P$) и второй модой ЭОФ аномалии геопотенциала изобарической поверхности AT_{500} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Ocean and the Global Water Cycle / G. Lagerloef [et al.] // *Oceanography*. 2010. Vol. 23, iss. 4. P. 82–93. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.07>
2. Maintenance and Broadening of the Ocean's Salinity Distribution by the Water Cycle / J. D. Zika [et al.] // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28, iss. 24. P. 9550–9560. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0273.1>
3. Intensification of the global water cycle and evidence from ocean salinity: a synthesis review / L. Yu [et al.] // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2020. Vol. 1472, iss. 1. P. 76–94. <https://doi.org/10.1111/nyas.14354>
4. Enhanced hydrological cycle increases ocean heat uptake and moderates transient climate change / M. Liu [et al.] // *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11, iss. 10. P. 848–853. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01152-0>
5. Climatological seasonal variation of the upper ocean salinity / Y. Liu [et al.] // *International Journal of Climatology*. 2022. Vol. 42, iss. 6. P. 3477–3498. <https://doi.org/10.1002/joc.7428>
6. Durack P. J., Wijffels S. E. Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23, iss. 16. P. 4342–4362. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3377.1>
7. Helm K. P., Bindoff N. L., Church J. A. Changes in the global hydrological-cycle inferred from ocean salinity // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37, iss. 18. L18701. <https://doi.org/10.1029/2010GL044222>
8. Yu L. A global relationship between the ocean water cycle and near-surface salinity // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C10. C10025. <https://doi.org/10.1029/2010JC006937>
9. Examining the salinity change in the upper Pacific Ocean during the Argo period / G. Li [et al.] // *Climate Dynamics*. 2019. Vol. 53, iss. 9–10. P. 6055–6074. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04912-z>
10. Salinity changes in the World Ocean since 1950 in relation to changing surface freshwater fluxes / N. Skliris [et al.] // *Climate Dynamics*. 2014. Vol. 43, iss. 3–4. P. 709–736. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2131-7>

11. *Durack P. J.* Ocean Salinity and the Global Water Cycle // *Oceanography*. 2015. Vol. 28, iss. 1. P. 20–31. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.03>
12. Improved Estimates of Changes in Upper Ocean Salinity and the Hydrological cycle / L. Cheng [et al.] // *Journal of Climate*. 2020. Vol. 33, iss. 23. P. 10357–10381. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0366.1>
13. Observed freshening and warming of the western Pacific Warm Pool / S. Cravatte [et al.] // *Climate Dynamics*. 2009. Vol. 33, iss. 4. P. 565–589. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0526-7>
14. A new record of Atlantic sea surface salinity from 1896 to 2013 reveals the signatures of climate variability and long-term trends / A. R. Friedman [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, iss. 4. P. 1866–1876. <https://doi.org/10.1002/2017GL072582>
15. *Shi H., Du L.* The unexpected salinity trend shifts in upper Tropical Pacific Ocean under the global hydrological cycle framework // *EGU General Assembly 2021*. Gottingen, 2021. EGU21-14698. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14698>
16. *Ростов И. Д., Дмитриева Е. В.* Региональные особенности межгодовых изменений температуры воды в субарктической зоне Тихого океана // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 2. С. 67–79. EDN JGICET.
17. Changes in Earth’s Energy Budget during and after the ”Pause” in Global Warming: An Observational Perspective / N. G. Loeb [et al.] // *Climate*. 2018. Vol. 6, iss. 3. 62. <https://doi.org/10.3390/cli6030062>
18. Causes and Impacts of the 2014 Warm Anomaly in the NE Pacific / N. A. Bond [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42, iss. 9. P. 3414–3420. <https://doi.org/10.1002/2015GL063306>
19. Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave / D. J. Amaya [et al.] // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. 1903. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15820-w>
20. *Ростов И. Д., Дмитриева Е. В.* Межгодовые изменения солености верхнего 1000-метрового слоя внутритропической зоны северо-западной части Тихого океана в условиях интенсификации глобального гидрологического цикла // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. Т. 40, № 2. С. 215–230. EDN TEOSTA.
21. *Corbett C. M., Subrahmanyam B., Giese B. S.* A comparison of sea surface salinity in the equatorial Pacific Ocean during the 1997–1998, 2012–2013, and 2014–2015 ENSO events // *Climate Dynamics*. 2017. Vol. 49, iss. 9–10. P. 3513–3526. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3527-y>
22. *Favorite F., Dodimead A. J., Nasu K.* *Oceanography of the Subarctic Pacific region, 1960–71*. Vancouver, Canada, 1976. 187 p. (International North Pacific Fisheries Commission Bulletin ; no. 33). URL: <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/17465.pdf> (date of access: 20.05.2024).
23. Interdecadal variability of the Western Subarctic Gyre in the North Pacific Ocean / H. Kuroda [et al.] // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021. Vol. 169. 103461. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103461>
24. *Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И.* Тенденции и региональные особенности изменчивости термических условий северо-восточной части Тихого океана севернее 30° с. ш. в последние четыре десятилетия // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 4. С. 448–466. EDN SLYDJV.

Об авторах:

Ростов Игорь Дмитриевич, заведующий лабораторией информатики и мониторинга океана, ФГБУН ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5081-7279**, **SPIN-код: 2239-0391**, rostov@poi.dvo.ru

Дмитриева Елена Витальевна, старший научный сотрудник, лаборатория информатики и мониторинга океана, ФГБУН ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0094-5296**, **SPIN-код: 6818-1898**, e_dmitrieva@poi.dvo.ru